# ИНЖЕНЕРНО-АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

УДК 631.316.02-001.5

**И.В. ИГНАТЕНКО**

## ЗАДАЧА ТЕРРАУПРУГОСТИ В ПОЧВООБРАБОТКЕ

*Решается задача построения математической модели процесса взаимодействия рабочего органа с почвой с учётом упругости его крепления. Отмечается аналогия её задачам аэро- и гидроупругости в классической механике. Модель построена в виде векторно-матричных уравнений в форме Коши, для чего введено понятие вектора состояния упругозакреплённого рабочего органа. Приведены перспективы применения модели для описания динамических эффектов почвообработки.*
***Ключевые слова:*** *почвообработка, рабочий орган, упругость, динамика.*

**Введение.** Применяемые в почвообработке математические описания взаимодействия рабочего органа с почвой широко используют постулат, что рабочий орган закреплён жёстко, движется поступательно, не отклоняясь от прямолинейной траектории [1]. Это расходится с реальным процессом. Исследования показывают, что движение рабочего органа в почве сопровождается значительными упругими смещениями и колебаниями интенсивностью до 8g по виброускорению [2]. Упругие смещения соизмеримы с глубиной хода и оказывают сильное влияние на качественные и энергетические показатели почвообработки. Величина упругих смещений составляет от 10 до 110 мм; искажения геометрии рабочих органов достигают 20 град/кН [3]. Абсолютно жесткого крепления не существует, поэтому в строгом смысле все крепления рабочих органов почвообрабатывающих машин упругие, и взаимодействие рабочих органов с почвой в земледельческой механике должно рассматриваться обязательно с учётом упругих смещений.

Новый подход к моделированию процесса взаимодействия рабочего органа с почвой связан с учётом его упругих смещений. Это позволяет в почвообработке рассматривать взаимодействие рабочего органа с почвенной средой как задачу террауупругости по аналогии с задачами аэроупругости и гидроупругости в механике, но для среды с более сложными реологическими свойствами.

**Постановка задачи**. Расчётная схема взаимодействия упругозакреплённого рабочего органа (УРЗО) с почвенной средой представлена на рис. 1. Рабочий орган 3 в виде трёхгранного клина крепится к раме 1 консольной стержневой системой 2 разной степени сложности (стойка, подвеска, грядиль и т.п.), выносящей место крепления за почвенный горизонт. Рама движется поступательно со скоростью V .

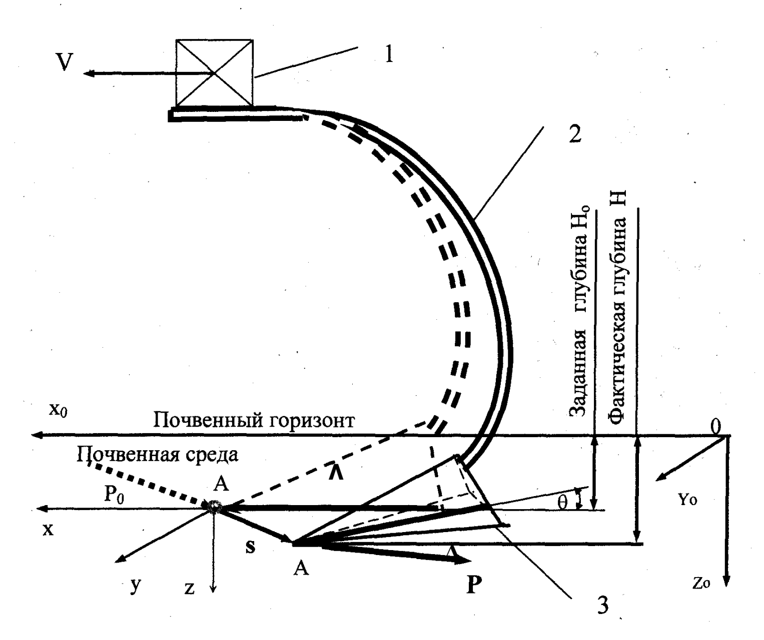



Рис.1. Расчётная схема упругих смещений рабочего органа:
1- рама; 2 – консольная стойка; 3 рабочий орган

Положение ненагруженного рабочего органа показано пунктиром. Оно соответствует проектной ориентации его в предположении, что упругие смещения отсутствуют. Подошва рабочего органа в этом случае должна лежать в горизонтальной плоскости. Ориентация рабочего органа задаётся вектором ориентации Λ, расположенным в подошве рабочего органа.

Под действием силы сопротивления $P_o$ стойка деформируется и рабочий орган получает упругие смещения, которые можно представить как смещение s носка лапы и поворота вектора ориентации на угол θ, из-за чего сила сопротивления P изменяется по величине и направлению. Новое положение рабочего органа при небольших углах поворота удобно характеризовать тремя углами поворота относительно осей координат. Эти углы имеют традиционные названия: $\theta_x$ - угол крена, $\theta_y$ - угол тангажа, $\theta_z$ - угол «рыскания». Они образуют вектор углов поворота $\theta = \{\theta x , \theta y , \theta z\}^T$

Смещения i–й точки рабочего органа:

$$s_i = s + [\Theta] L , \qquad (1)$$

где L - радиус-вектор текущей точки рабочего органа относительно его носка; [Θ] - матрица вращений на угол θ.

Зависимость смещений от нагрузки $s_i$ (P) характеризует траектории точек и в общем случае нелинейна. Для нелинейных систем справедливы законы деформирования в приращениях:

$$ds = [\Delta] dP, \qquad (2)$$

$$dP = [C] ds , \qquad (3)$$

$$d\theta = [H] dP, \qquad (4)$$

где [Δ] – симметричная матрица податливости размерности 3*3; $[C]=[\Delta]^{-1}$. – симметричная матрица жёсткости, размерности 3*3; [H] – матрица угловой податливости размерности 3*3, причем $h_{ii}=0$, i=1,2,3.

Нелинейности делают все эти матрицы зависимыми от нагрузки. Для определённости их необходимо определять в рабочей точки вблизи номинальной нагрузки $P_н$ , при котором работает упругое крепление.

Направление приложения силы описывает вектор направляющих косинусов $n = \{n_1, n_2, n_3\}^T$, ($n_1= \cos\psi_1$ , $n_2= \cos\psi_2$ , $n_3= \cos\psi_3$), т.е.

$$P = |P| n . \qquad (5)$$

Упругие смещения характеризуются величиной и направлением. Направление упругих смещений на практике характеризуют параметром $\lambda = s_X/s_Z$ :

$$\lambda=(\delta_{12}\cos\psi_1+\delta_{22} \cos\psi_2+\delta_{23} \cos\psi_3)/(\delta_{11}\cos\psi_1+\delta_{12}\cos\psi_2+\delta_{13}\cos\psi_3). \qquad (6)$$

В зависимости от направления смещения носка лапы существуют три кинематические режима: с заглублением $\lambda > 0$, равновесный $\lambda = 0$ и с выглублением $\lambda < 0$. В отношении устойчивости хода по глубине предпочтительнее второй режим, не реагирующий на неоднородности почвенной структуры.

Упругие смещения рабочего органа искажают геометрию резания и вызывают отклонения глубины хода от заданной (см. рис.1). Для обеспечения агротребований упругая кинематика должна регламентироваться.

Агротехнические требования к кинематике упругих смещений рабочего органа сводятся к трём условиям:

1. Глубина хода носка рабочего органа при рабочей нагрузке должна соответствовать заданной, т.е вертикальные смещения его должны равняться нулю: $ds_Z = 0$.

2. Направление упругих смещений должно быть равно требуемому по технологии и энергосбережению, т.е.

$$\lambda = \lambda_{треб} . \qquad (7)$$

3. Вертикальные упругие смещения любых точек подошвы УЗРО не должны выходить за пределы агродопуска Ад:

$$\{s + [\Theta] L\}_z < Ад , \qquad (8)$$

где $\Theta$ – матрица вращений для углов $\theta = [H]P_н$ ; L – длина подошвы.

**Методика математического моделирования.** В общем случае система «рабочий орган – почва – крепление» является системой с распределёнными параметрами и распределённой нагрузкой и должна описываться трудноразрешимыми уравнениями в частных производных. Динамическую модель теории террауупругости целесообразно строить переходом на макроуровень через вектор состояния [4].

Вектор состояния системы «УРЗО-почва» включает векторы положения носка рабочего органа П, вектор углов поворота $\theta$ и их производные:

$$\Im = \{П; \theta; dП/dt; d\theta /dt\}. \qquad (9)$$

Сопротивление почвы описывает вектор F размерности n=6, включающий составляющие силы сопротивления P и момента M:

$$F = \{P ; M\}=\{Px, Py, Pz, Mx, My, Mz\}^T . \qquad (10)$$

Согласно положениям теории разрушения почв в земледельческой механике [1, с.118-120], факторами, от которых зависит сопротивление почвы, являются глубина обработки, скорость и геометрия рабочего органа, площадь сечения пласта, свойства почвенной среды (Горячкин В.П., Кацыгин В.В., Зеленин А.Н., Новиков Ю.Ф., Бурченко П.Н. и др.). Режимные факторы входят в вектор состояния $\Im$. Это означает, что для конкретной ситуации сопротивление почвы зависит от компонентов вектора состояния, являясь его вектор-функцией:

$$F = F[\Im] . \qquad (11)$$

В существующей теории резания крепление считается абсолютно жёстким, обеспечивающим постоянные значения вектора состояния, т.е. $\Im_o$= {П; 0; V; 0} = const. Новым подходом к построению модели взаимодействия рабочего органа с почвой в терраупругости является учёт изменений вектора состояния за счёт его упругих смещений, всегда возникающих под нагрузкой за счёт деформаций крепления.

Упругие смещения s и углы поворота $\theta$ УЗРО образуют 6-мерный вектор обобщенных координат УЗРО:

$$q =\{ s ; \Theta\}= \{ x, y, z, \theta x, \theta y, \theta z \}^T . \qquad (12)$$

Вектор U изменения состояния рабочего органа за счет упругих смещений размерности 2n:

$$U = \{ s; \theta; ds/dt; d\theta /dt \} . \qquad (13)$$

Результирующее значение вектора состояния

$$\Im = \Im o + U = \{ H+s; \theta; V+ ds/dt; d\theta /dt\} \qquad (14)$$

и сопротивление почвы движению рабочего органа зависит от упругих смещений:

$$F = F \{\Im o + U \}.$$

Использование вектора состояния позволяет при моделировании системы с распределёнными параметрами перейти на макроуровень. Разлагая формы упругих смещений по формам собственных колебаний основных частот и приводя силы и массы к носку рабочего органа, удалось свести задачу к матричному дифференциальному уравнению в форме Коши [4], в котором за фазовые координаты приняты изменения вектора состояния U:

$$Y U' = G U + R\{\Im\} + \rho(t), \qquad (15)$$

где G , Y - блочные матрицы собственных свойств упругой системы размерности 2n со структурой вида

$$G = \begin{vmatrix} E & 0 \\ -C & -B \end{vmatrix}, \qquad Y = \begin{vmatrix} E & 0 \\ 0 & A \end{vmatrix},$$

где A - диагональная матрица коэффициентов инерции; B- симметричная матрица коэффициентов диссипации; C- симметричная матрица коэффициентов жесткости; E, 0 - соответственно единичная и нулевая матрицы размерности n; R{$\Im$} - нелинейная детерминированная вектор-функция реакции почвенной среды размерности 2n:

$$R\{\Im\} = R\{\Im o + U\} ; \qquad (16)$$

$\rho(t)$ - случайная составляющая реакции вследствие неоднородностей почвенной среды.

В структуре векторов реакции присутствуют векторы сопротивления почвы: детерминированная составляющая F и случайная f(t):

$$R\{\Im\} = [0; F \{\Im\}], \; R\{\Im o +U\}=[0; F\{\Im o +U\}, \; \rho(t)=[0; f(t)].$$

Число n обобщенных координат выбирается в зависимости от конкретной задачи. При отсутствии моментов M упругие прогибы консольного крепления пропорциональны углам поворота. Число независимых координат в этом случае n=3, и векторы обобщённых координат и сопротивления трёхмерны: $q=s=\{x, y, z\}^T$; $F=P=\{Px, Py, Pz\}^T$.

Система из уравнений (15) и (16) образует динамическую модель терраупругости. Первое уравнение системы описывает упругие смещения рабочего органа, второе - энергетику технологического процесса по принципу "вход-выход".

Структура модели представлена на рис 2. В её основе лежит встречно-параллельное соединение двух звеньев: звена УЗРО, описываемого уравнением (15), и звена энергетики технологического процесса почвообработки, описываемого уравнением (16).

Как видно из схемы, упругость крепления образует обратную связь между выходом и входом модели. Наличие такой обратной связи является важной отличительной особенностью работы УЗРО, позволяющей объяснить все динамические эффекты процесса.

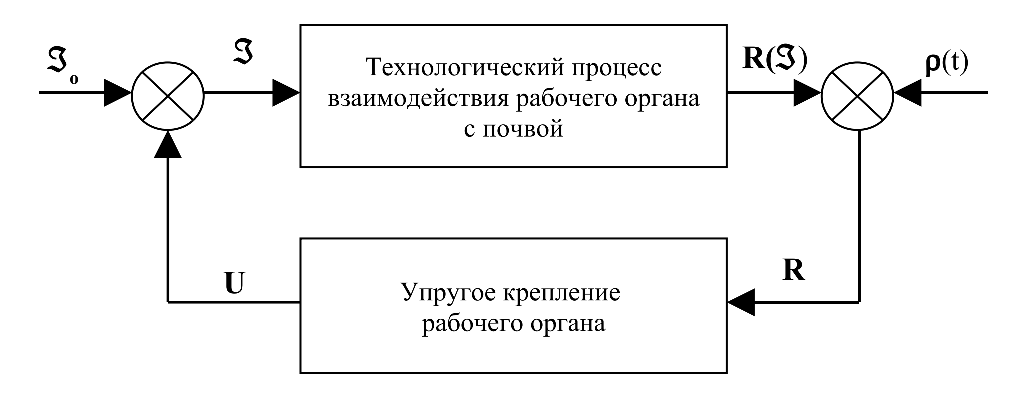



Рис 2. Структура модели терраупругости

**Анализ модели.** При анализе нелинейную вектор-функцию R{ℑ} подвергли статистической линеаризации. По правилам статистической линеаризации

$$R\{\Im\} = \underline{R}\{\Im o\} + \underline{R}_u + [Q]\, u, \quad (17)$$

$$[Q] = [D_{uu}] * [D_{ru}], \quad (18)$$

$$d\underline{R}_u = [Q]\, d\underline{U}, \quad (19)$$

где $\underline{U}$ - вектор математического ожидания фазовых координат; u - центрированный вектор фазовых координат; [Q] - матрица коэффициентов статистической линеаризации порядка 2n

$$Q = \begin{matrix} 0 & 0 \\ Qs & Qv \end{matrix},$$

$[D_{uu}]$ - матрица коэффициентов корреляции фазовых координат; $[D_{ru}]$ - матрица взаимных коэффициентов корреляции упругой реакции и фазовых координат; $[Q_v]$, $[Q_s]$ - матрицы коэффициентов линеаризации порядка n; $\underline{R}_u$ - вектор средних значений нелинейной вектор-функции R{U}; по физическому смыслу - реакция системы на упругость.

Линеаризованные уравнения задачи включают динамическое уравнение колебаний "относительно среднего" и уравнение энергоэффекта "в среднем":

$$Y u' = \{[G] + [Q]\}\, u + \rho(t), \quad (20)$$

$$[G]\, \underline{U} + \underline{R}\{\Im_o\} + \underline{R}_u = 0. \quad (21)$$

Достоинством модели линеаризованной модели терраупругости является то, что каждое слагаемое имеет физический смысл: матрица [G] описывает свойства упругого крепления рабочего органа; матрица [Q] описывает упругие и вязкие свойства почвенной среды; по физическому смыслу является матрицей квазиупругости почвенной среды; среднее значение реакции системы на упругость $\underline{R}_u$ характеризует энергоэффект УЗРО по отношению к жёсткому; $\underline{R}\{\Im o\}$ - статическая характеристика жесткой системы, являющаяся традиционной задачей земледельческой механики о зависимости силы сопротивления от режимов резания.

Влияние упругости крепления рабочего органа на энергозатраты процесса почвообработки, определяемые средним значением реакции на упругость $\underline{R}_U$.возможно по выражениям (18), (19). Энергоэффект оказывается зависимым не только от средних значений упругого сопротивления $\underline{U}$, но и от их дисперсий $D_{UU}$, что свидетельствует о существовании виброэффекта.

Для практического использования уравнения модели (20), (21) могут приводиться к трёхмерной форме, в которой параметры модели имеют традиционный физический смысл:

$$[A]s'' + [B_1]s' + [C_1]s = p_B(t), \qquad (22)$$

где

$$[C_1] = [C] + [Q_S]\ , \quad [B_1] = [B] - [Q_V]\ ;$$

$[C_1]$, $[C]$ - матрицы жесткости нагруженной и ненагруженной системы; $[B_1]$, $[B]$ - матрицы затухания нагруженной и ненагруженной системы; $[Q_V]$, $[Q_S]$ - матрицы вносимого затухания и квазижесткости почвы; $p_B(t)$ - внешняя возмущающая сила с нулевым математическим ожиданием ;

$$p_B(t) = p_A(t) + p_Ш(t),$$

где $p_A(t)$ и $p_Ш(t)$ – соответственно периодическая и случайная составляющая возмущений; s, s′, s″ - центрированные значения соответственно вибросмещений, виброскорости и виброускорений.

**Возможности модели.** Модель терраупругости, более полно описывая характер движения рабочего органа в почвенной среде, позволяет выявить ряд динамических эффектов [5]: прецессию собственных частот при нагружении системы, существование неустойчивых режимов движения рабочего органа типа дивергенции и флаттера, появление автоколебаний, их взаимодействие с вынужденными, и, что особенно ценно для практики, влияние упругости крепления рабочего органа на энергозатраты процесса почвообработки.

**Пример.** Рассмотрим УЗРО культиватора в виде стрельчатой лапы. Симметрия нагружения позволяет ограничиться рассмотрением движения в продольно-вертикальной плоскости XOY с одним углом поворота θу – тангаж. Нагрузка на культиваторную лапу сводится к одной равнодействующей силе P, крутящий момент отсутствует. Вектор упругих смещений будет состоять из двух координат $s = [x, z]^T$.

Всё это позволяет решать плоскую задачу, ограничиваясь двумя уравнениями в приращениях:

$$a_{11}x'' + c_{11}x + c_{12}z = \Delta P_x(x, z) + p_{Bx}(t), \qquad (23)$$
$$a_{22}z'' + c_{21}x + c_{22}z = \Delta P_z(x, z) + p_{Bz}(t).$$

По Горячкину В.П., тяговое сопротивление пропорционально площади сечения деформируемого пласта $S_п$:

$$P = (k + \varepsilon V^2)\, S_п\ , \qquad (24)$$

где k , ε – коэффициенты удельного сопротивления, зависящие от свойств почвы и геометрии резания.

Обозначив $(k + \varepsilon V^2)=K(V)$, получим $P = K(V)\, S_п$ .

В свою очередь, площадь пласта и геометрия резания зависят от упругих смещений рабочего органа, тогда $K = K(x, z)$; $S_п = S_п (x, z)$ и сила сопротивления оказывается сложно зависимой от смещений x, z:

$$P(x, z) = K(x, z)\, S_п (x, z). \qquad (25)$$

Зададимся целью исследовать систему на устойчивость. Рассмотрим автономный режим, положив $p_{BX}(t)= p_{BZ}(t)=0$. При малых упругих смещениях (намного меньше глубины хода) нелинейностями вектор-функции P(x, z ) можно пренебречь, тогда приращение составляющих силы сопротивления ΔP будет линейной комбинацией от x, z :

$$\Delta P_x = к_{11}\, x + к_{12}\, z\ , \qquad (26)$$
$$\Delta P_x = к_{21}\, x + к_{22}\, z.$$

Подставляя эти выражения в уравнения (23) и пренебрегая силами демпфирования колебаний УЗРО в воздушной среде, получаем систему дифференциальных уравнений вида:

$$x'' + \alpha_{11} x + \alpha_{12}\, z = 0, \qquad (27)$$
$$z'' + \alpha_{21} x + \alpha_{22}\, z = 0.$$

где

$$\alpha_{11} = (c_{11} - к_{11})/\ a_{11}\ ;\ \alpha_{12} = (c_{12} - к_{21})/\ a_{11}\ ;$$
$$\alpha_{21} = (c_{21} - к_{21})/\ a_{22}\ ;\ \alpha_{22} = (c_{22} - к_{22})/\ a_{22}.$$

Полученные уравнения - полный аналог классической модели флаттера в упрощённой форме по Пановко Я.Г. [7, с.334]. Такое совпадение моделей носит принципиальный характер и свидетельствует о физическом родстве процессов аэроупругости и терраупругости и обоснованности постановки задач терраупругости в почвообработке.

Анализ корней характеристического уравнения системы (27) даёт два условия устойчивости [7, с.335]:

$$\alpha_{11}\, \alpha_{22} - \alpha_{12}\, \alpha_{21} \le (\alpha_{11} + \alpha_{22})^2 /4, \qquad (28.1)$$
$$\alpha_{11}\, \alpha_{22} - \alpha_{12}\, \alpha_{21} \ge 0. \qquad (28.2)$$

Невыполнение первого условия, по Пановко Я.Г., приводит к дивергенции, а невыполнение второго – к флаттеру [7, с.335].

Поскольку входящие в условия величины $\alpha_{ik}$ включают в себя значения $c_{ik}$ i, k = 1, 2, то добиться соблюдения условий (28) устойчивой работы УЗРО возможно только варьированием элементов матрицы жёсткости [C] , особенно её недиагональных элементов, характеризующих межкоординатные связи и кинематический режим работы крепления.

Поиск периодических решений и энергоэффекта требует учёта нелинейностей функции P(x, z) по выражению (25). Аналитическое её определение для практики имеет определённые трудности.

Целесообразнее получать P(x, z) экспериментально. При этом следует учесть, что отношение z/x = λ характеризует направление упругих смещений, и зависимость P(x, z) можно толковать как зависимость от кинематического режима P(x, λ). При горизонтальной силе сопротивления направляющие косинусы (5) $n_1 = 1$, $n_2 = n_3 = 0$ и по выражению (6) показатель $\lambda = \delta_{12} / \delta_{11} = - c_{12}/c_{11}$. Экспериментально изучена регрессионная модель вида:

$$P = f\,(\lambda,\ c_{11}). \qquad (29)$$

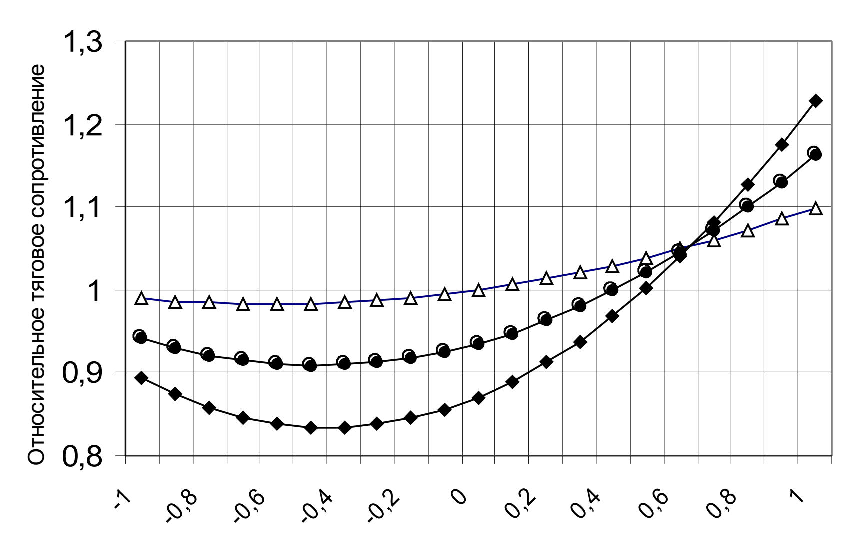
Получено регрессионное уравнение зависимости тягового сопротивления от кинематического режима и жёсткости:

$$P = 68 + 8{,}0x_1 - 7{,}16x_1^2 + 2{,}5x_2x_1 - 2{,}8x_1^2x_2\ , \qquad (30)$$

где $x_3 = 0{,}19\lambda$; $x_4 = (c_{11} - 45)/20$.

На рис.3 показаны зависимости P(λ) для упругих подвесок разной жесткости: ♦ - $c_{11}$ = 25 Н/мм, • - $c_{11}$ = 45 Н/мм и Δ - $c_{11}$ = 65 Н/мм, при скорости движения V=12 км / ч, и глубине обработки H =11 см.

Важнейшим обстоятельством является наличие минимума силы сопротивления вблизи нулевого кинематического режима. Минимум силы сопротивления наблюдается при значениях кинематического показателя $\lambda_1$= (-0;05)-(-0,1). Эти значения соответствуют слабому режиму с выглублением.




Кинематический режим $x_3 = \lambda_1/0{,}19$

Рис.3. Зависимость тягового сопротивления
от кинематического режима при различной жёсткости

Степень значимости оптимизации кинематического показателя λ характеризуется крутизной нарастания функции вблизи оптимума. Из графиков видно (рис.3), что изменение показателя кинематического режима от 0 до 1,19 (усиление режима заглубления) вызывает значительное увеличение тягового сопротивления от 10 до 45% в зависимости от жёсткости крепления. Если учесть, что для почвообработки существенным является снижение и на 5-10%, то отмеченные изменения говорят о высокой чувствительности тягового сопротивления к изменению кинематики упругих смещений и достаточно высокой эффективности способа энергосбережения за счёт её оптимизации. Чувствительным к кинематике упругих смещений оказывается и режим выглубления: изменение кинематического режима на 0,09 вызывает потери энергосбережения на 5 %.

Таким образом, регрессионный анализ экспериментальных данных отчётливо подтверждает оптимизационность задачи: существование минимума тягового сопротивления при изменении упругой кинематики и высокую чувствительность энергетики процесса почвообработки к изменению кинематики упругих смещений, а значит, и потенциально высокую эффективность способа энергосбережения за счёт её оптимизации.

**Выводы.** Предлагаемая динамическая модель терраупругости отражает все особенности задачи взаимодействия рабочего органа с почвой (многомерность, нелинейность, автоколебательность), пригодна для различных почвенных сред и различных рабочих органов; большинство существующих энергетических моделей почвообработки является её частными случаями.

Применяемый для описания модели математический аппарат в виде матричных линеаризованных дифференциальных уравнений вводит её в русло современных достижений аналитической механики и, следовательно, может опираться на её развитое компьютерное программное обеспечение. Разработанная модель терраупругости в состоянии описать сложные динамические эффекты, сопровождающие движение УЗРО в почвенной среде: появление неустойчивых режимов, автоколебания, прецессию собственных частот и траекторий, вибро- и энергоэффект.

Теория терраупругости позволила разработать практические рекомендации, ряд которых положен в основу отраслевых методических указаний МУ 23.2.48-89, разработанных с НПО ВИСХОМ [6]. Они включают предложения, методики и алгоритмы по измерениям, расчётам, идентификации и оптимизации упругих смещений рабочих органов почвообрабатывающих машин.

## Библиографический список

1. Машиностроение: энциклопедия под ред. К.В.Фролов и др. – М.: Машиностроение. Т. 1V-16. СХМ и оборудование, 1998. – 578 с.

2. *Игнатенко И.В.* Экспериментальные исследования динамики работы упругой подвески рабочих органов культиваторов / И.В. Игнатенко, С.В. Левицкий // Комплексная механизация и автоматизация сельскохозяйственного производства. – Ростов н/Д, 1979. – С.141-149.
3. *Поветьев А.И.* О нормировании упругих смещений рабочих органов культиватора / А.И. Поветьев, В.И.Гасилин, Н.А. Китаев, И.В. Игнатенко // Параметры перспективных почвообрабатывающих рабочих органов и машин: тр. ВИМ. – М., 1981. – Т. 90. – С.45-51.
4. *Игнатенко И.В.* Динамическая модель взаимодействия упруго-закреплённого рабочего органа с почвой // Научная мысль Кавказа. – 2002. – №14. – С.90-98.
5. *Игнатенко И.В.* Энергетические аспекты взаимодействия упруго закреплённого рабочего органа с почвой в земледельческой механике: монография / И.В. Игнатенко. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2002. – 160 с.
6. *Инаекян С.А.* Определение и расчёт параметров упругих стоек рабочих органов почвообрабатывающих машин: метод. указ. / С.А. Инаекян, И.В. Игнатенко, А.А. Завражнов, В.П. Жаров. – М.: ВИСХОМ, 1990. – 60 с.
7. *Пановко Я.Г.* Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, ошибки и парадоксы / Я.Г. Пановко, И.И.Губанова. – М.: Наука, Физматгиз, 1979. – 384 с.

Материал поступил в редакцию 26.02.08.

**I.V. IGNATENKO**

## TERRAELASTICITY PROBLEM IN AGRICULTURAL.

The problem of mathematical description of the moving process of a labour body in the soil with allowance for fastening elasticity is being soloed now. The analogy with the problems of aero and hidroelasticity is being established now. A model in the form of Coshy has been obtained; drag force depends on elastic shift.

**ИГНАТЕНКО Иван Васильевич** (р.1941), профессор кафедры «Сельскохозяйственные машины» Донского государственного технического университета, доктор технических наук (2003). Окончил РИСХМ (1963).

Научные интересы связаны с конструированием и расчётом зерноперерабатывающей и почвообрабатывающей техники.
Автор свыше 70 научных статей, 10 а.с. на изобретение и 8 учебных пособий.